

Przetworniki c/a są szeroko stosowane w wielu urządzeniach elektronicznych, m.in. w układach do sterowania graficznych monitorów ekranowych, we wszelkiego typu układach analogowych, sterowanych cyfrowo (np. wzmacniacze, zasilacze), a ostatnio także w układach odtwarzających sygnały akustyczne lub wizyjne, zarejestrowane w postaci cyfrowej.

W pierwszej części artykułu omówiono najczęściej stosowane układy przetworników c/a i ich parametry, a w drugiej jako przykład przetwornika c/a omówiono układ DAC08 z podaniem kilku jego zastosowań.

Przetwornik cyfrowo-analogowy jest układem, który odtwarza sygnał analogowy (napięcie, prąd) zakodowany w postaci cyfrowej. Produkowane seryjnie przetworniki c/a są wykonywane głównie jako układy scalone monolityczne lub hybrydowe. Mimo istnienia wielu metod przetwarzania większość przetworników c/a można przedstawić w postaci schematu blokowego (rys. 1).

W skład typowego przetwornika c/a wchodzi:

- zespół przełączników elektronicznych, sterowanych wejściowymi sygnałami cyfrowymi,
- sieć rezystorów,
- precyzyjne źródło napięcia odniesienia,
- przetwornik prąd–napięcie w układzie ze wzmacniaczem operacyjnym (w przetwornikach c/a z wyjściem napięciowym).

Wartość analogowego sygnału wyjściowego przetwornika c/a zależy od wejściowego słowa cyfrowego oraz od wartości sygnału odniesienia. Dla przykładu przyjmijmy, że kod cyfrowy pojawiający się na wejściu przetwornika jest kodem naturalnym binarnym, a wartość napięcia odniesienia jest równa U_R . Wówczas sygnał wyjściowy S (napięcie lub prąd) jest równy:

$$S = k(a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_n 2^{-n}) U_R$$

przy czym:

k — współczynnik proporcjonalności,

$a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_n 2^{-n}$ — liczba kodowana słowem wejściowym.

Ogólnie biorąc, jeżeli wejściowe słowo cyfrowe reprezentuje liczbę L (w dowolnym kodzie), to sygnał wyjściowy S jest równy:

$$S = k L U_R$$

Sygnał wyjściowy S jest proporcjonalny do iloczynu napięcia odniesienia i liczby reprezentowanej przez słowo wejściowe. Przetwornik c/a stanowi więc w istocie układ mnożący dwa sygnały: jeden cyfrowy, drugi analogowy i dający wynik w postaci analogowej. W wielu przetwornikach nie można w pełni wykorzystać właściwości mnożenia dwóch sygnałów, gdyż źródło napięcia odniesienia znajduje się wewnątrz układu scalonego, przyłączone na stałe do sieci rezystorów.

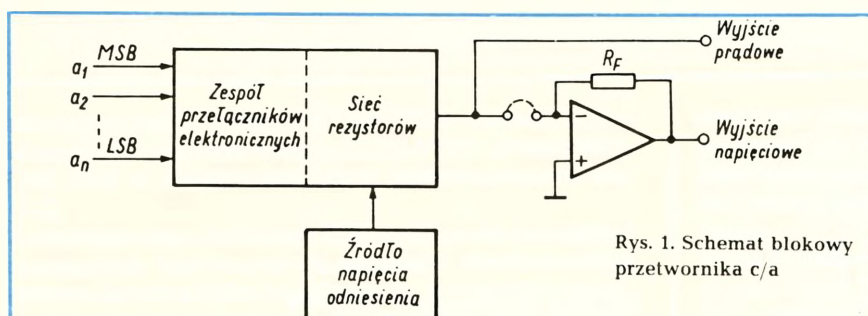
W niektórych jednak wypadkach źródło napięcia odniesienia jest dołączane zewnątrz przez użytkownika i producent przewiduje możliwość przyłączenia sygnału zmiennego zamiast napięcia stałego. W takich wypadkach stosuje się nazwę mnożący przetwornik c/a.

Przetworniki c/a są często stosowane w systemach cyfrowego przetwarzania lub przesyłania sygnałów analogowych. Jest to obecnie intensywnie rozwijana dziedzina elektroniki mająca duże znaczenie m.in. w sprzęcie powszechnego użytku. W urządzeniach typu Compact Disc sygnał akustyczny jest podczas nagrywania przetwarzany na postać cyfrową w przetworniku a/c i następnie zapisywany na dysku. W procesie odtwarzania wymagane jest zatem zastosowanie przetwornika c/a. Podobnie jest w telewizji cyfrowej. W tym wypadku przed emisją sygnał wizji jest przetwarzany na postać cyfrową, następnie przesyłany do odbiornika i po odpowiedniej obróbce odtwarzany przez przetwornik c/a. Wymagane parametry obu systemów znacznie się różnią. W urządzeniach Compact Disc stosuje się przetworniki wolne, ale o dużej rozdzielczości — wielobitowe (np. 18-bitowe). Przetwarzany jest bowiem sygnał wolny, ale o dużej dynamice. W telewizji natomiast stosuje się przetworniki bardzo szybkie, dokonujące kilkudziesięciu milionów przetworzeń na sekundę, ale o małej liczbie bitów. Podyktowane jest to szerokim pasmem sygnału wizyjnego i stosunkowo małą dynamiką.

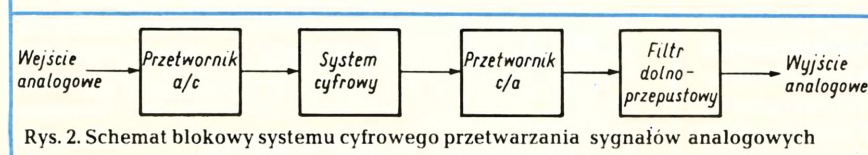
Ogólnie system cyfrowego przetwarzania sygnałów analogowych jest przedstawiony na schemacie blokowym (rys. 2).

Wejściowy sygnał analogowy przetworzony przez przetwornik a/c na postać cyfrową jest doprowadzany do wejścia systemu cyfrowego. System cyfrowy (np. mikroprocesorowy) dokonuje zaprogramowanej obróbki sygnału przedstawionego w formie cyfrowej. Po zakończeniu obróbki sygnał cyfrowy jest przetwarzany przez przetwornik c/a na postać analogową. Wynika z tego, że zadanie jakie spełnia przetwornik c/a jest odwrotne do zadania przetwornika a/c. Jest to słuszne z tym zastrzeżeniem, że przetwarzanie c/a nie stanowi prostego odwrócenia przetwarzania a/c.

Występujący w przetworniku a/c pro-



Rys. 1. Schemat blokowy przetwornika c/a



Rys. 2. Schemat blokowy systemu cyfrowego przetwarzania sygnałów analogowych

ces kwantyzacji nie ma odpowiednika w przetworniku c/a. W wyniku kwantyzacji nieskończenie wiele różnych wartości analogowych (należących do tego samego przedziału kwantowania) jest przetworzonych na jedną (tę samą) wartość cyfrową. Jest to proces nieodwracalny i przetwornik c/a nie może odtworzyć idealnie sygnału wejściowego mimo, że sam (przynajmniej teoretycznie) nie wprowadza żadnych błędów.

Sygnal wyjściowy przetwornika c/a przy zmianie wejściowego słowa cyfrowego zmienia się skokowo, czemu mogą towarzyszyć zakłócenia w postaci szpilek. W celu zredukowania zakłóceń, a także w celu wygładzenia przebiegu wyjściowego, do wyjścia przetwornika c/a przyłączany jest często filtr dolnoprzepustowy.

Mimo wspólnego schematu blokowego poszczególne typy przetworników c/a mogą się różnić rozwiązaniami przełączników elektronicznych, siecią rezystorów oraz sposobem zasilania sieci rezystorów przez źródło napięcia odniesienia.

PRZETWORNIKI c/a Z REZYSTORAMI WAŻONYMI

Najczęściej stosuje się dwa typy sieci rezystorów:

- rezystory o wartościach ważonych,
- drabinkę rezystancyjną typu R-2R.

Na rys. 3 przedstawiono schemat przetwornika c/a z rezystorami o wartościach ważonych dwójkowo. Układ działa w sposób następujący. Sygnały odpowiadające poszczególnym bitom słowa wejściowego sterują przyporządkowanymi sobie przełącznikami. Jeżeli i -ty bit jest równy 1, to i -ty przełącznik zostanie przyłączony do źródła napięcia odniesienia U_R i przez odpowiadający mu rezystor popłynie prąd o wartości:

$$I_i = \frac{U_R}{R \cdot 2^{i-1}}$$

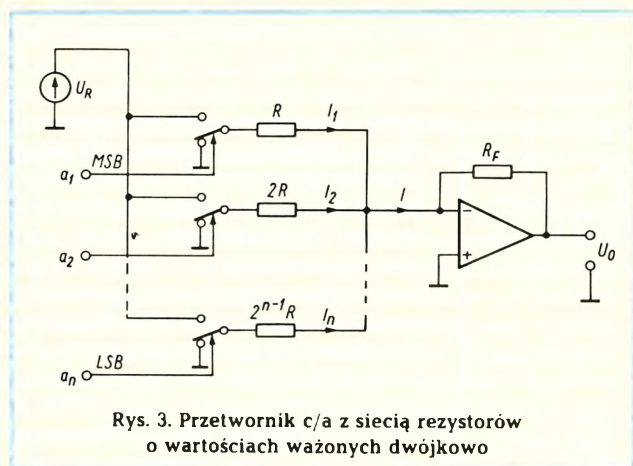
Jeżeli i -ty bit jest równy 0, to prąd $I_i = 0$. Na przykład, jeżeli bit $a_1 = 0$, prąd I_1 płynący przez rezystor R jest równy zero. Jeżeli przyłożymy $a_1 = 1$, wówczas przez rezystor R popłynie prąd $I_1 = \frac{U_R}{R}$. Analogicznie można obliczyć prądy dla

pozostałych bitów, zmienia się tylko wartość prądu. Wzmacniacz operacyjny pracuje w układzie sumującego przetwornika prąd-napięcie. Do węzła A wpływa prąd I będący sumą prądów I_1, I_2, \dots, I_n :

$$I = a_1 \frac{U_R}{R} + a_2 \frac{U_R}{2R} + \dots + a_n \frac{U_R}{2^{n-1}R}$$

Po przekształceniach:

$$I = \frac{U_R}{R/2} (a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_n 2^{-n})$$



Rys. 3. Przetwornik c/a z siecią rezystorów o wartościach ważonych dwójkowo

Sprężenie zwrotne, istniejące we wzmacniaczu operacyjnym (rezystor R_F), utrzymuje potencjał wejścia odwracającego bardzo bliski 0 V, dzięki czemu przełączanie prądów I_1, I_2, \dots, I_n nie wpływa wzajemnie na siebie. Ponieważ $U_0 = I_F R_F$ oraz $I_F = -I$, więc

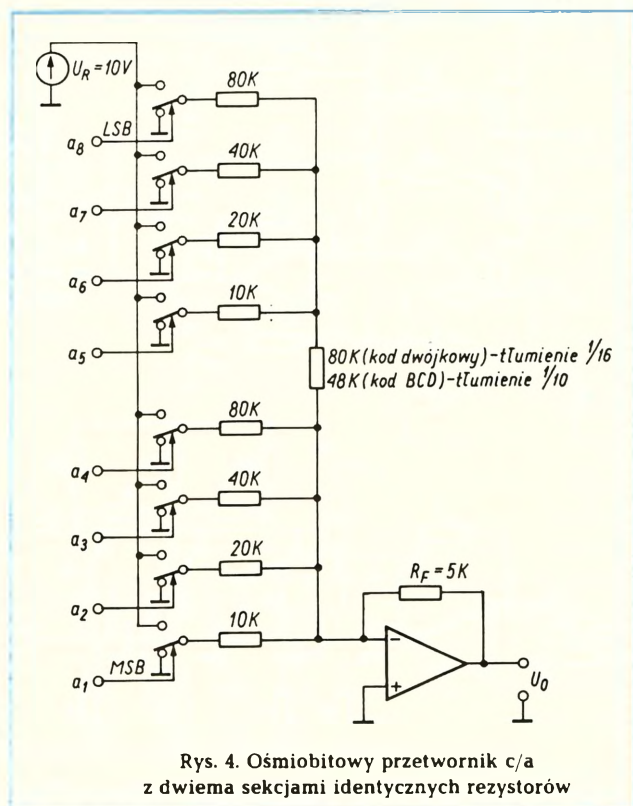
$$U_0 = -\frac{U_R R_F}{R/2} (a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_n 2^{-n})$$

Istotną cechą układu jest to, że rezystancja widziana z wejścia odwracającego wzmacniacza operacyjnego jest zawsze taka sama, niezależnie od położenia przełączników. Umożliwia to łatwą kompensację błędów wynikających z nierównoważenia wzmacniacza operacyjnego.

Poważną wadą układu jest natomiast stosowanie rezystorów różniących się od siebie znacznie wartością rezystancji. Na przykład, dla przetwornika 10-bitowego przy założeniu, że $R_1 = 100 \Omega$, trzeba zastosować rezystor $R_{10} = 2^{10-1} R_1 = 2^9 \cdot 100 \Omega = 51,2 \text{ k}\Omega$. Wada ta czyni podany układ niepraktycznym dla technologii układów scalonych oraz kosztownym i mało dokładnym przy realizacji dyskretniej (zwłaszcza dla długiego słowa a_1, a_2, \dots, a_n).

Opisaną wadę można zmniejszyć stosując metodę przedstawioną na rys. 4. W układzie zastosowano dwie sekcje rezystorów ważonych, każdą dla grupy czterech bitów. Obie sekcje są rozdzielone dodatkowym rezystorem o tak dobranej wartości, aby między sekcją sterowaną przez młodsze bity, a sekcją sterowaną przez starsze bity występowało tłumienie równe $\frac{1}{16}$. Dzięki temu waga 4. młodszych bitów jest 16 razy mniejsza od wagi 4. starszych bitów. Mimo więc zastosowania dwóch jednakowych sekcji rezystorów otrzymuje się wagi poszczególnych bitów odpowiadające kodowi naturalnemu binarnemu.

Dodatkową zaletą podanego układu jest możliwość pracy z kodem BCD. Wystarczy tylko zmienić wartość współczynnika tłumienia między sekcjami młodszą i starszą z $\frac{1}{16}$ na $\frac{1}{10}$



Rys. 4. Ośmiobitowy przetwornik c/a z dwiema sekcjami identycznymi rezystorów

(osiąga się to przez zmianę wartości rezystora włączanego między sekcjami). W tym wypadku każda sekcja jest sterowana przez 4 bity (tetradę) kodujące jedną cyfrę dziesiętną. Niezależnie od zastosowanego kodu możliwa jest rozbudowa przetwornika przez dołączenie dodatkowych sekcji w celu zwiększenia długości słowa wejściowego.

PRZETWORNIKI c/a Z DRABINKĄ REZYSTOROWĄ R-2R

Liczba rezystorów wchodzących w skład jednej sekcji może być zupełnie dowolna. W szczególnym wypadku sekcja może się składać z pojedynczego rezystora. Otrzymuje się więc wówczas układ przedstawiony na rys. 5.

W poprzednim wypadku wagi bitów sterujących jednakowe rezystory w obu sekcjach różniły się 16-krotnie, gdyż bity te były oddalone od siebie o 4 pozycje ($16 = 2^4$). Stąd wynikał współczynnik tłumienia $\frac{1}{16}$. Teraz bity są oddalone

o jedną pozycję, a więc ich wagi różnią się dwukrotnie ($2 = 2^1$). Należy więc ustalić współczynnik tłumienia równy $\frac{1}{2}$. Uzyskuje się to dobierając wartości rezystorów R i 2R.

Stąd pochodzi nazwa zestawu rezystorów: drabinka R-2R. Układ działa w ten sposób, że zmiana położenia dowolnego przełącznika powoduje zmiany prądu wpływającego do węzła sumacyjnego wzmacniacza operacyjnego o wartość odpowiadającą wadze bitu sterującego dany przełącznik. Wzmacniacz operacyjny pracuje jako przetwornik prąd-napięcie i zamienia prąd wypływający z drabinki na napięcie wyjściowe. Podobnie, jak w wypadku sieci rezystorów ważonych, rezystancja widziana z węzła sumacyjnego wzmacniacza operacyjnego jest stała, niezależnie od położenia przełączników. Ze względu na łatwość wykonania drabinka R-2R jest często stosowana w układach scalonych.

PRZETWORNIKI c/a ZE ŹRÓDŁAMI PRĄDOWYMI

W wielu przetwornikach c/a wykorzystuje się napięcie odniesienia do zasilania precyzyjnych źródeł prądowych. Przetworniki tego typu pracują na zasadzie sumowania prądów źródeł prądowych. Sieci rezystorowe w takich układach są użyte albo do ustalenia wartości prądów, albo jako dzielniki prądu.

Na rys. 6 przedstawiono czterobitowy przetwornik c/a wykorzystujący rezystory o wartościach ważonych do ustalenia wartości prądów. Źródła prądowe zbudowane są w układzie zwierciadła prądowego. Ponieważ potencjał baz wszystkich tranzystorów jest jednakowy, prądy poszczególnych tranzystorów zależą od wartości rezystorów włączonych w obwód emitera.

Wszystkie tranzystory są tak wykonane, aby spadki napięcia baza-emiter były jednakowe. Tranzystory przewodzą różne prądy, aby więc wyrównać spadki napięcia baza-emiter stosuje się różne powierzchnie emitera (jest to zaznaczone na schematach przez rysowanie tranzystorów z wieloma emiterami).

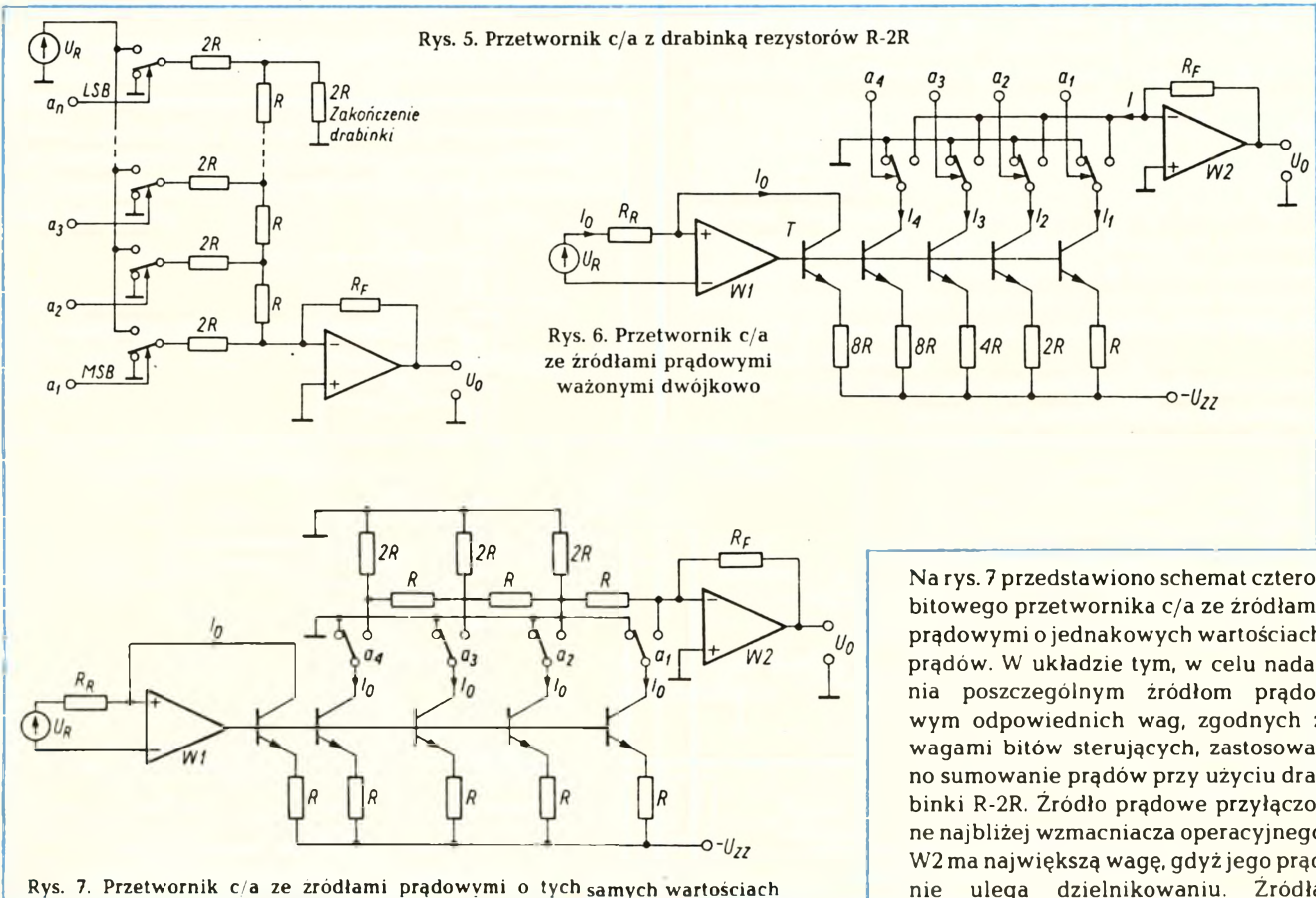
Prąd tranzystora T jest równy:

$$I_0 = \frac{U_R}{R_R}$$

Wobec tego prądy poszczególnych tranzystorów są równe:

$$\begin{aligned} I_4 &= I_0 & I_2 &= 4 I_0 \\ I_3 &= 2 I_0 & I_1 &= 8 I_0 \end{aligned}$$

Podany układ zwierciadła prądowego jest dość złożony, lecz odznacza się dobrymi właściwościami temperaturowymi i stałą wartością stosunku prądów (zależną od stosunku rezystancji emiterowych). Poszczególne bity słowa wejściowego sterują położeniem przełączników, tym samym ustalając wartość prądu I oraz napięcia wyjściowego.



Rys. 5. Przetwornik c/a z drabinką rezystorów R-2R

Rys. 6. Przetwornik c/a ze źródłami prądowymi ważonymi dwójkowo

Rys. 7. Przetwornik c/a ze źródłami prądowymi o tych samych wartościach

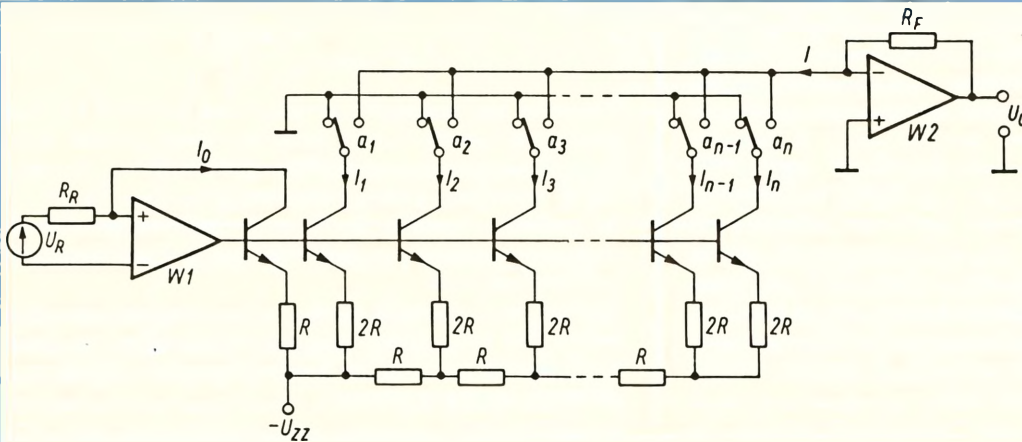
Na rys. 7 przedstawiono schemat czterobitowego przetwornika c/a ze źródłami prądowymi o jednakowych wartościach prądów. W układzie tym, w celu nadania poszczególnym źródłom prądowym odpowiednich wag, zgodnych z wagami bitów sterujących, zastosowano sumowanie prądów przy użyciu drabinki R-2R. Źródło prądowe przyłączone najbliższemu wzmacniacza operacyjnego W2 ma największą wagę, gdyż jego prąd nie ulega dzielnikowaniu. Źródła

prądowe włączone dalej od wzmacniacza mają mniejsze wagi ze względu na tłumiące działanie drabinki. Drabinkę rezystorów R-2R stosuje się również do ustalenia wartości prądów źródeł prądowych. Na rys. 8 przedstawiono przykładowy układ tego typu.

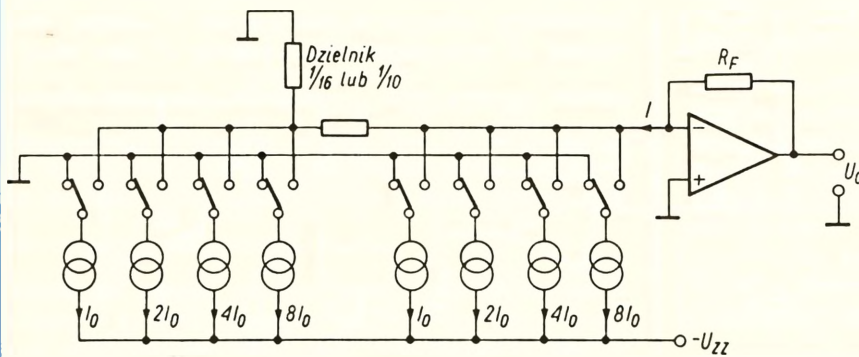
Wskutek tłumiącego działania sekcji drabinki prądy kolejnych tranzystorów włączonych w układzie coraz dalej od wzmacniacza operacyjnego W1 są coraz mniejsze.

przyłączenie do węzła sumacyjnego przetwornika prąd-napięcie dodatkowego źródła prądowego (rys. 11).

Wartość prądu dodatkowego I jest równa wartości prądu odpowiadającej najstarszemu bitowi. Istotną zmianą jest ponadto przeciwne sterowanie przełącznika przez najstarszy bit (bit znaku), tzn. jeżeli $a_1 = 0$, wówczas prąd $8I$ wypływa z węzła sumacyjnego, a dla $a_1 = 1$ źródło prądowe jest przyłączone do masy. W efekcie, dla $a_1 = 0$ $U_{wy} \geq 0$, dla



Rys. 8. Przetwornik c/a z drabinką R-2R ustalającą prąd źródeł prądowych



Rys. 9. Przetwornik c/a z jednakowymi sekcjami źródeł prądowych

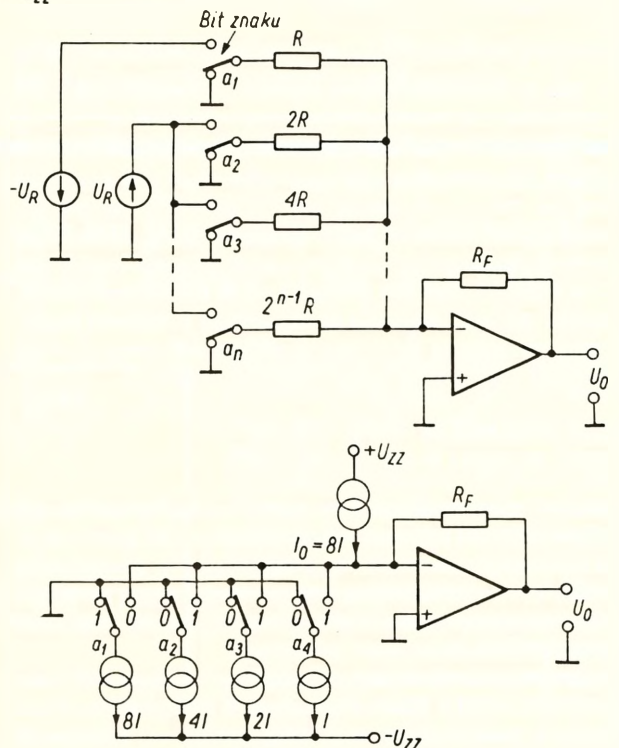
Rys. 10. Przetwornik c/a pracujący z kodem uzupełnień do 2

Dzięki własnościom drabinki R-2R prądy sąsiednich źródeł różnią się od siebie dwukrotnie. Są również rozwiązania, w których wykorzystuje się identyczne grupy czterech źródeł prądowych o wartościach ważonych (rys. 9). Grupy te są łączone ze sobą przez dzielniki prądu tłumiące w stosunku $\frac{1}{16}$ dla kodu naturalnego binarnego lub $\frac{1}{10}$ dla kodu BCD. Działanie tych układów jest takie samo, jak działanie układu przedstawione na rys. 4.

PRZETWORNIKI Z KODEM BIPOLARNYM

Przetworniki c/a pracujące z kodami reprezentującymi liczby zarówno dodatnie jak i ujemne wymagają zastosowania dwóch źródeł napięć odniesienia o przeciwnych polaryzacjach. Na rys. 10 przedstawiono przykład czterobitowego c/a pracującego z kodem uzupełnień do 2.

Bit 1 jest bitem znaku i jednocześnie bitem o największej wadze. Rezystor odpowiadający temu bitowi jest przyłączony do napięcia $-U_R$, podczas gdy pozostałe rezystory do napięcia $+U_R$. W związku z tym, w zależności od wartości bitu znaku prąd może wpływać lub wypływać z węzła sumacyjnego przetwornika prąd-napięcie. Odpowiada to napięciom wyjściowym ujemnym lub dodatnim. Dla $a_1 = 0$ $U_{wy} \leq 0$, dla $a_1 = 1$ $U_{wy} \geq 0$. Napięcie wyjściowe jest równe zero, gdy wszystkie bity słowa wyjściowego są równe zero. Innym sposobem realizacji przetwornika bipolarnego jest

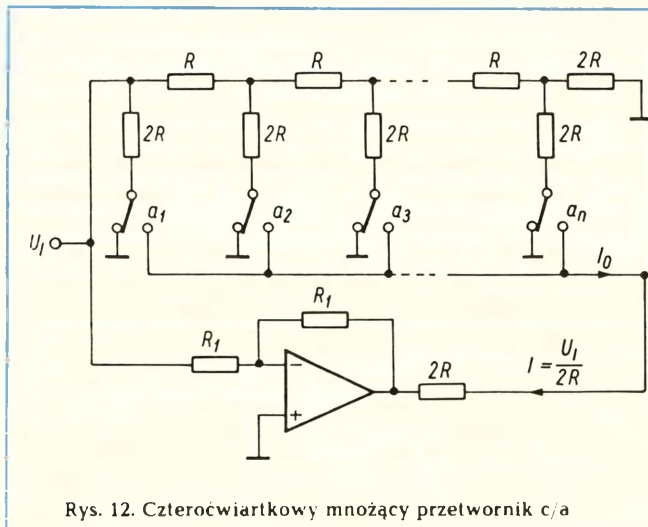


Rys. 11. Przetwornik bipolarny z dodatkowym źródłem prądowym

$a_1 = 1$, $U_{wy} < 0$. Dla wszystkich bitów równych zeru napięcie wyjściowe jest również równe zero. Dobierając inną wartość prądu dodatkowego I_0 (i standardowe sterowanie przełączników) można uzyskać przetwornik c/a pracujący z kodem binarnym przesuniętym.

MNOŻĄCE PRZETWORNIKI c/a

Jak wspomniano na wstępie, dla uzyskania w przetworniku c/a operacji mnożenia trzeba jako jedno z wejść wykorzystać wejście napięcia odniesienia. Jeżeli analogowe napięcie wejściowe może przyjmować tylko wartości o jednej polaryzacji oraz jeżeli zastosowano w przetworniku unipolarny kod cyfrowy, to przetwornik nosi nazwę jednoćwiartkowego. Jeżeli kod cyfrowy jest bipolarny, a napięcie wejściowe unipolarne, wówczas przetwornik nazywa się dwućwiartkowym. Wreszcie, gdy oba sygnały wejściowe są bipolarne, przetwornik nazywa się czteroćwiartkowym. Wprowadzone nazwy pochodzą od prostokątnego układu współrzędnych x, y . Jeżeli obie zmienne nie zmieniają znaku, to opisują punkty położone tylko w jednej ćwiartce. Jeżeli, np. x ma stały znak, a y może się zmieniać od wartości ujemnych do dodatnich, to para (x, y) opisuje punkty położone w dwóch ćwiartkach itd.



Rys. 12. Czteroćwiartkowy mnożący przetwornik c/a

Przykład przetwornika czteroćwiartkowego jest przedstawiony na rys. 12. Podobnie jak w układzie na rys. 11, zastosowano dodatkowe źródło prądowe, lecz o wydajności prądowej zależnej od wartości napięcia wejściowego. W ten sposób zrealizowana jest praca z kodem bipolarnym niezależnie od wartości napięcia wejściowego. Ponieważ napięcie wejściowe może się zmieniać od wartości ujemnych do dodatnich, jest to więc układ czteroćwiartkowy.

ŹRÓDŁA NAPIĘCIA ODNIESIENIA I PRZEŁĄCZNIKI ELEKTRONICZNE

Oprócz omówionych już sieci rezystorowych oraz źródeł prądowych istotnymi elementami składowymi przetworników c/a są źródła napięcia odniesienia i przełączniki elektroniczne. Źródła napięcia odniesienia mogą być integralnie złączone z przetwornikiem lub mogą być dołączane przez użytkownika.

Powszechnie stosuje się dwa typy źródeł napięcia odniesienia: diody Zenera i układ zbudowany z tranzystorów bipolarnych o skompensowanych temperaturowo napięciach baza-emiter (ang. band-gap reference).

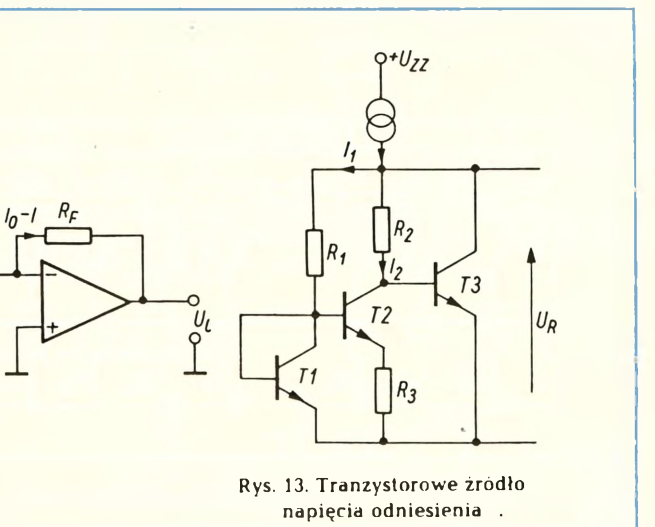
Diody Zenera stosowane jako źródła napięcia odniesienia są

zawsze skompensowane termicznie. Można wówczas otrzymać współczynniki temperaturowe rzędu kilkunastu ppm/K. Stałość temperaturowa i niski poziom szumów są bowiem krytycznymi parametrami źródeł napięć odniesienia. Niestety, ze względu na poziom szumów i niestalość napięcia w czasie, diody Zenera nie są najlepszymi źródłami napięciowymi. Z tego powodu często korzysta się z układu, którego uproszczony schemat przedstawiono na rys. 13. Z analizy układu wynika, że napięcie wyjściowe U_R jest równe:

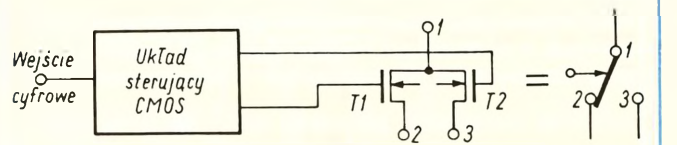
$$U_R = U_{BE3} + \frac{R_2}{R_1} \frac{kT}{q} \ln \frac{I_1}{I_2}$$

Ponieważ oba składniki wyrażenia na napięcie U_R mają przeciwne współczynniki temperaturowe, można układ skompensować termicznie dobierając wartości R_2, R_3 oraz I_1 i I_2 . W warunkach pełnej kompensacji napięcie $U_R = 1,2$ V. W praktyce uzyskuje się współczynniki temperaturowe napięcia U_R podobne jak w diodzie Zenera, lecz o mniejszym poziomie szumów.

Śród wielu znanych przełączników elektronicznych do zastosowań w przetwornikach c/a najczęściej wykorzystuje się tranzystory polowe MOS oraz tranzystory bipolarne w układach kluczy prądowych.



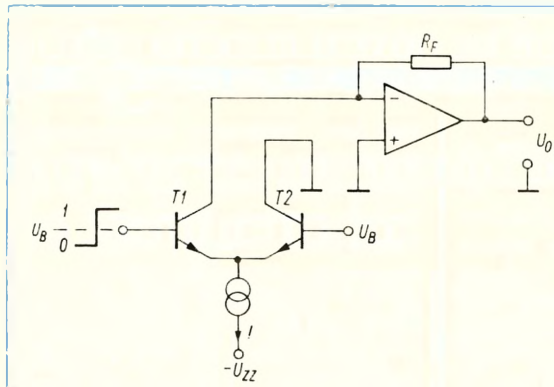
Rys. 13. Tranzystorowe źródło napięcia odniesienia



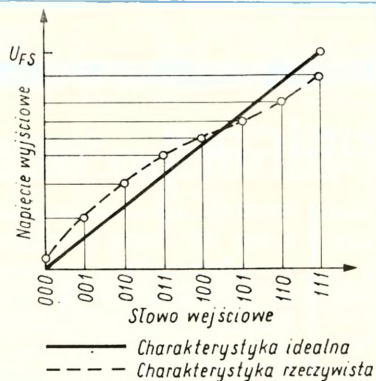
Rys. 14. Przełącznik z tranzystorami MOS

Przykład przełącznika z tranzystorami NMOS jest przedstawiony na rys. 14. Tranzystory T_1 i T_2 są sterowane w taki sposób, że jeden z nich przewodzi, a drugi jest odcięty. W ten sposób układ spełnia funkcję przełącznika dwupozycyjnego. Część sterująca tranzystory T_1 i T_2 jest wykonana w technologii CMOS.

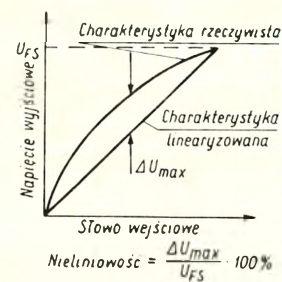
Tranzystory bipolarne są stosowane jako przełączniki w układach przetworników c/a ze źródłami prądowymi. Z reguły stosuje się parę różnicową pracującą jako klucz prądowy (rys. 15). Baza tranzystora T_1 jest przyłączona do stałego potencjału, a tranzystor T_1 jest sterowany wejściowym sygnałem cyfrowym. Przy wysokim poziomie logicznym na bazie tranzystora T_1 zaczyna przewodzić cały prąd I , a T_2 zostaje odcięty. Gdy sygnał wejściowy jest równy 0, to przewodzi tranzystor T_2 , prąd I wpływa do masy i nie bierze udziału w ustalaniu napięcia wyjściowego.



Rys. 15. Klucz prądowy



Rys. 16. Charakterystyka przetwarzania dla 3-bitowego przetwornika c/a



Rys. 17. Sposób określenia nieliniowości

PODSTAWOWE PARAMETRY PRZETWORNIKÓW c/a

Najważniejszymi parametrami przetworników c/a są rozdzielczość, dokładność i szybkość działania.

Rozdzielczość określa się liczbą bitów słowa wejściowego. Seryjnie wytwarzane przetworniki mają rozdzielczość do 18 bitów. Na podstawie długości słowa wejściowego można określić najmniejszą zmianę sygnału wyjściowego w odniesieniu do całego zakresu. Dla przetwornika n -bitowego można uzyskać 2^n różnych wartości sygnału wyjściowego. Wynika stąd, że zmiana słowa wejściowego na pozycji

najmniej znaczącej (LSB) stanowi $\frac{1}{2^n}$ część pełnego zakresu

przetwarzania. Często tę właśnie wartość, wyrażoną w procentach, podaje się jako rozdzielczość przetwornika c/a. Np. dla długości słowa wejściowego 10 bitów rozdzielczość

jest równa $\frac{1}{2^{10}} \cdot 100\% \approx 0,1\%$.

Dokładność określa się jako różnicę między wartością zmierzoną a przewidywaną napięcia wyjściowego odniesioną do napięcia pełnej skali. Dokładność można wyznaczyć na podstawie porównania charakterystyki przetwarzania rzeczywistej i idealnej (rys. 16).

Charakterystyka przetwarzania jest z natury swojej nieciąg-

ła. Wygodnie jednak jest posługiwać się linią ciągłą, otrzymaną przez połączenie wszystkich punktów charakterystyki. W idealnym wypadku jest to linia prosta przechodząca przez początek układu współrzędnych.

Charakterystyka rzeczywista uwzględnia błędy nieliniowości przetwarzania, nierównoważenie układu oraz błąd skalowania. Sumaryczny błąd określający dokładność powinien być mniejszy od połowy zmiany napięcia wyjściowego, odpowiadającej zmianie najmniej znaczącego bitu (w skrócie zapisuje się $\frac{1}{2}$ LSB).

Istotnym czynnikiem wpływającym na dokładność, ze względu na brak możliwości regulacji, jest nieliniowość. Określa się ją przez podanie maksymalnego odchylenia charakterystyki rzeczywistej od prostej przechodzącej przez punkt początkowy i końcowy charakterystyki rzeczywistej. Wartość tę odnosi się do zakresu przetwarzania i wyraża w procentach (rys. 17).

Szybkość działania przetwornika określa się przez pomiar czasu ustalenia, tzn. czasu, po którym napięcie wyjściowe osiągnie wartość ustaloną z określonym błędem (zwykle $\frac{1}{2}$ LSB). Najszybszymi są przetworniki ze źródłami prądowymi bez wyjściowych konwerterów prąd-napięcie.

Przetworniki cyfrowo-analogowe c/a (2) MIECZYŚLAW KRĘCIEJEWSKI

W tej części artykułu omówiono budowę, parametry i zastosowania przetwornika c/a typu DAC-08.

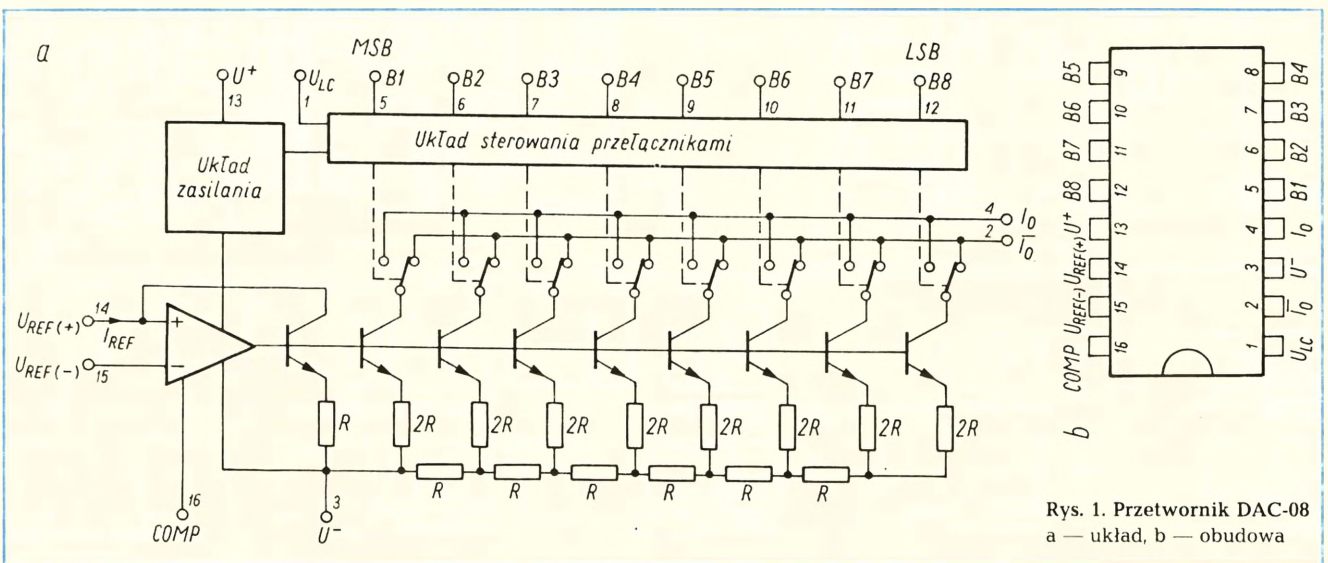
Przetwornik DAC-08 został opracowany w firmie amerykańskiej PMI. W ostatnich latach jego produkcję rozpoczęła TESLA. W wykonaniu czechosłowackim układ jest oznaczony symbolem MDAC-08. Na końcu symbolu występują dodatkowo jedna lub dwie litery oznaczające zakres temperatury pracy oraz dokładność.

Układ DAC-08 jest 8-bitowym mnożącym przetwornikiem c/a o dużej szybkości działania.

Schemat blokowy układu wraz z oznaczeniami wyprowadzeń przedstawiono na rys. 1. Podstawowe parametry układu zebrano w tablicy.

Przetwornik DAC-08 zawiera:

- zespół 8. źródeł prądowych ze wzmacniaczem operacyjnym,
- drabinkę rezystorową R-2R,
- zespół 8. przełączników,
- układ sterowania przełącznikami,
- układ polaryzacji.



Rys. 1. Przetwornik DAC-08
a — układ, b — obudowa

Wybrane parametry układu MDAC-08
Parametry dopuszczalne

Parametry	min	max
Napięcie zasilania $U^+ - U^-$		36 V
Napięcie wejść cyfrowych	U^-	$U^- + 36 V$
Napięcie U_{LC}	U^-	U^+
Napięcie $U_{REF(+)}$ i $U_{REF(-)}$	U^-	U^+
Napięcie różnicowe $U_{REF(+)} - U_{REF(-)}$	-18 V	+18 V
Prąd odniesienia I_{REF}		5 mA
Moc strat		500 mW
Temperatura pracy MDAC-08C	-55 C	+125 C
MDAC-08CC	0 C	+70 C
MDAC-8EC	0 C	+70 C

Parametry	Wartość
Rozdzielczość	8 bitów
Nieliniowość MDAC-08C	$\pm 0,19\%$ FS
MDAC-08CC	$\pm 0,39\%$ FS
MDAC-08EC	$\pm 0,19\%$ FS
Czas ustalenia prądu wyjściowego (z dokł. $\pm 1/2$ LSB)	8 ns
Poziom logiczny ($U_{LC} = 0$): 0	$\leq 0,8 V$
1	$\geq 2,0 V$
Pobór prądu ze źródeł zasilających ($I_{REF} = 2 mA$): U^+	$\leq 4 mA$
U^-	$\leq 8 mA$
Maksymalna szybkość zmian prądu odniesienia I_{REF}	8 mA/ μs
Niestabilność termiczna	$10 \cdot 10^{-6}/K$

Współpraca z układami cyfrowymi różnych rodzin

Końcówka oznaczona U_{LC} umożliwia przystosowanie przetwornika do współpracy z elementami cyfrowymi należącymi do różnych rodzin. Napięcie przyłożone do niej ustala wartość napięcia progowego wejść cyfrowych B1...B8, przy którym są przełączane przełączniki. Napięcie progowe jest o około 1,4 V wyższe od napięcia U_{LC} . Wartość napięcia progowego można dobrać z zakresu $-10...+13,5 V$. Dla współpracy z układami TTL końcówkę U_{LC} wystarczy połączyć z masą. W wypadku układów CMOS stosuje się różne warianty polaryzacji wejścia U_{LC} w zależności od napięcia zasilającego układy cyfrowe. Przykładowe rozwiązania są przedstawione na rys. 2.

Prąd odniesienia

Przetwornik DAC-08 jest układem mnożącym, w którym prąd odniesienia I_{REF} , tzn. prąd wpływający do wejścia $U_{REF(-)}$, może być stały lub może się zmieniać w zakresie od 0 do 4 mA. Suma prądów wyjściowych I_0 i \bar{I}_0 jest równa prądowi zakresowemu I_{FS} i wynosi:

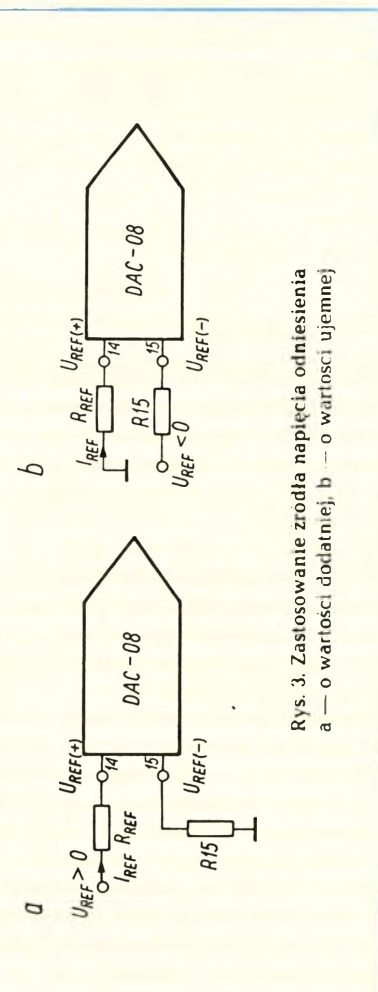
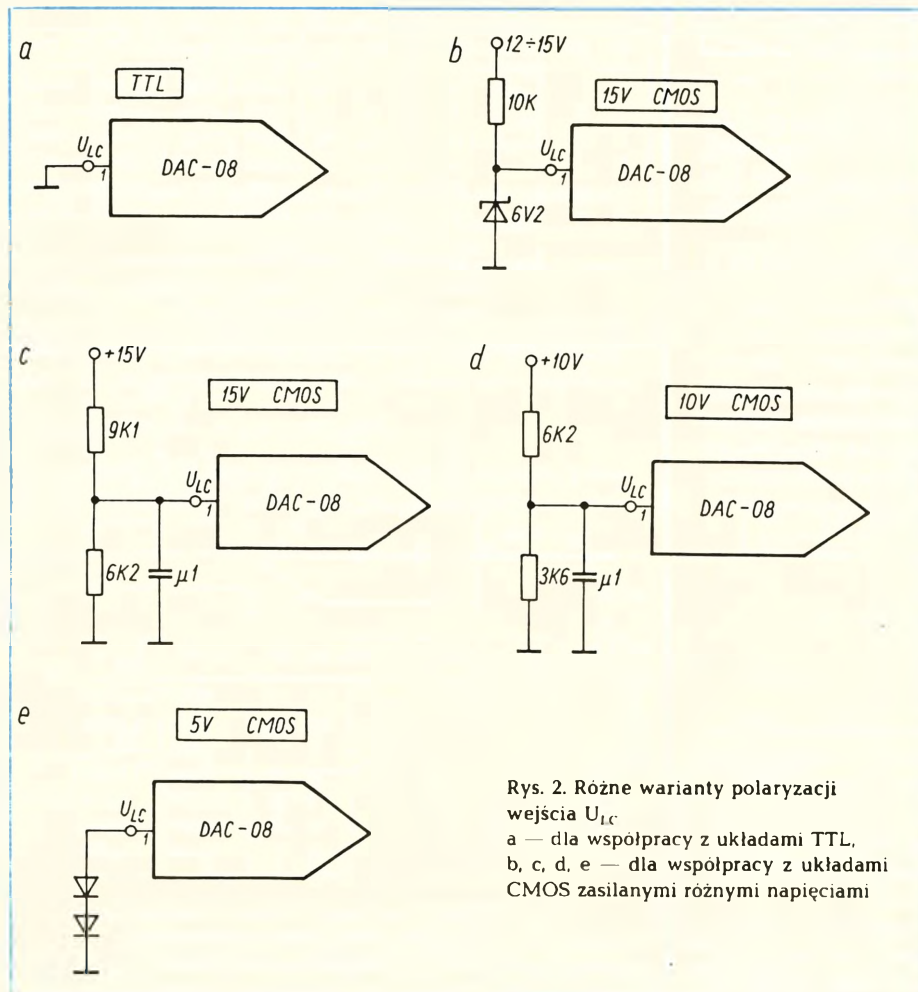
$$I_{FS} = \frac{255}{256} \cdot I_{REF}$$

Wartość prądu I_{REF} można ustalić wykorzystując napięcie odniesienia o wartości dodatniej lub ujemnej (rys. 3).

W obu przypadkach wartość prądu odniesienia jest równa

$$I_{REF} = \frac{V_{REF}}{R_{REF}}$$

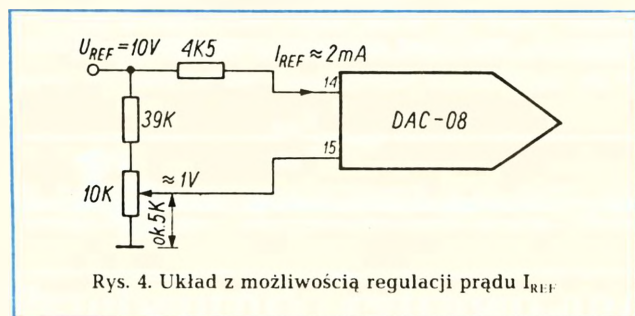
z tą różnicą, że w przypadku przedstawionym na rys. 3b źródło napięcia odniesienia jest praktycznie nie obciążone.



Rezystor R_{REF} powinien być wykonany z dużą dokładnością oraz mieć mały współczynnik temperaturowy. Te same uwagi dotyczą źródła napięcia odniesienia.

Producent zaleca stosować źródło napięcia odniesienia $U_{REF} = +10\text{ V}$ w celu uzyskania dobrej stabilności termicznej przetwornika. Wynika to z faktu, że przy stosunkowo wysokim napięciu U_{REF} , wpływ napięcia niezrównoważenia wzmacniacza operacyjnego oraz dryft tego napięcia jest pomijalny. Powyższe warunki są spełnione przez układ scalony REF-01 (oznaczenie Tesli MAC-01) zaprojektowany specjalnie jako źródło napięcia odniesienia. Rezystor R_{15} powinien mieć wartość taką samą, jak rezystor R_{REF} w celu minimalizowania błędów pochodzących od prądu polaryzacji wzmacniacza operacyjnego.

W wypadku, gdy istnieje konieczność dokładnego ustalenia prądu I_{REF} , zamiast pojedynczego rezystora R_{REF} można zastosować szeregowe połączenie rezystora stałego i potencjometru. W układzie takim może jednak ulec pogorszeniu stabilność temperaturowa z powodu stosunkowo dużego współczynnika temperaturowego potencjometru. W przypadkach, gdzie jest to niedopuszczalne, zaleca się stosować układ przedstawiony na rys. 4. W układzie tym tak dobrano



Rys. 4. Układ z możliwością regulacji prądu I_{REF} .

wartości elementów, aby położenie suwaka było w przybliżeniu środkowe. W związku z tym zmiany rezystancji potencjometru w wyniku zmiany temperatury są po obu stronach suwaka identyczne i kompensują się, nie pogorszając stałości prądu I_{REF} .

Zalecana przez producenta wartość prądu I_{REF} zawiera się w granicach 0,2...4 mA.

Wyjścia przetwornika DAC-08

Przetwornik DAC-08 ma dwa komplementarne wyjścia prądowe I_0 oraz \bar{I}_0 . Każde z ośmiu źródeł prądowych jest podłączone do wyjścia I_0 lub \bar{I}_0 . Wartość prądu I_0 zależy od wartości prądu I_{REF} oraz stanu wejść cyfrowych:

$$I_0 = I_{REF} \left(\frac{B_1}{2} + \frac{B_2}{4} + \frac{B_3}{8} + \frac{B_4}{16} + \frac{B_5}{32} + \frac{B_6}{64} + \frac{B_7}{128} + \frac{B_8}{256} \right)$$

przy czym:

B_i — stan logiczny i -tego bitu wejściowego

Prąd \bar{I}_0 jest natomiast równy:

$$\bar{I}_0 = I_{FS} - I_0$$

Najprostsza metoda uzyskania napięciowego sygnału wyjściowego polega na dołączeniu rezystorów obciążających. Przykładowy układ jest przedstawiony na rys. 5 wraz z tablicą określającą napięcia wyjściowe. W układzie tym napięcia wyjściowe przyjmują tylko wartości ujemne. Jeżeli napięcia wyjściowe muszą mieć wartości dodatnie i ujemne, stosuje się układ przedstawiony na rys. 6.

Wadą obu podanych układów jest duża rezystancja wyjściowa (R_0). Wobec tego napięcia wyjściowe nie mogą być bezpośrednio przyłączone do układów o małej rezystancji

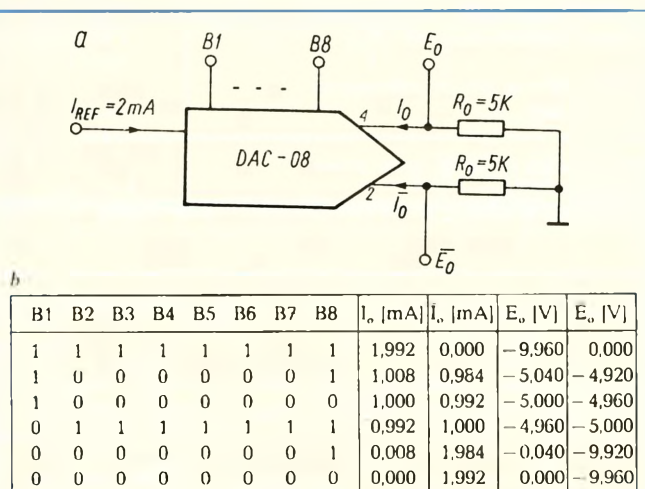
wejściowej. Zwykle trzeba stosować bufor (wtorniki napięcia) w celu separacji obciążenia. Układ taki jest przedstawiony na rys. 7a.

Zamiast wtornika można również użyć wzmacniacza w układzie odwracającym, pracującego jako konwerter prąd-napięcie (rys. 7b). W układzie tym napięcia wyjściowe przybierają tylko wartości dodatnie.

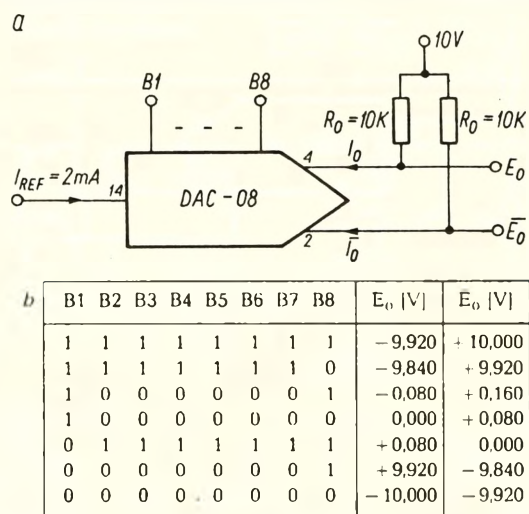
Wyjściowe napięcie bipolarne można także uzyskać w układzie przedstawionym na rys. 8a przez specjalne przyłączenie napięcia odniesienia. Tym samym kod wejściowy przestaje być naturalnym kodem dwójkowym i staje się kodem dwójkowym przesuniętym. Tablica działania układu przedstawiona na rys. 8b zawiera wybrane wartości bitów $B_1...B_8$ wraz z odpowiadającymi im wartościami napięcia wyjściowego E_0 .

Napięcia, które mogą wystąpić w czasie pracy przetwornika na wyjściach I_0 i \bar{I}_0 , powinny być wyższe o 2,5 V od ujemnego napięcia zasilającego U^- i nie powinny przekraczać wartości 36 V również względem U^- .

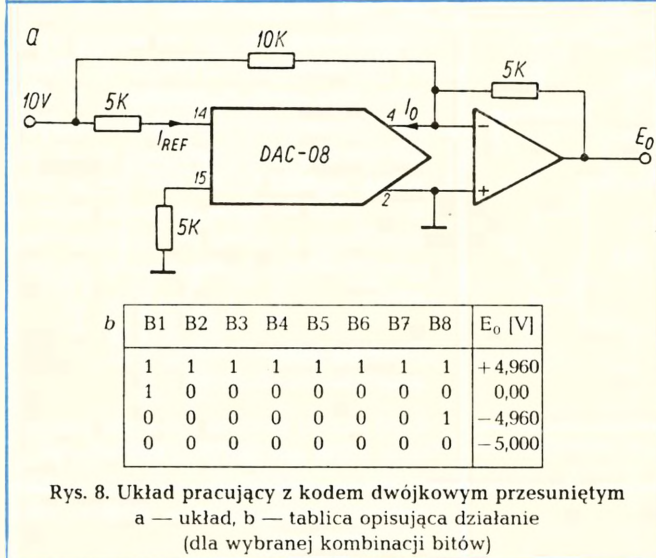
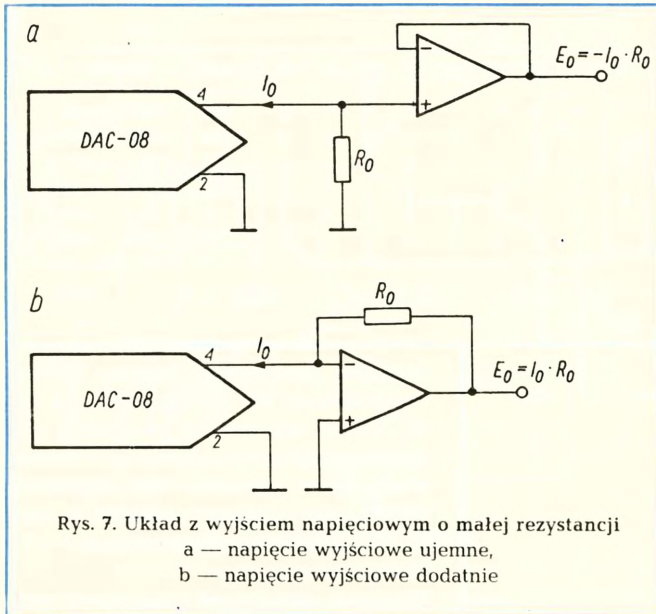
Jeżeli któreś z wyjść I_0 albo \bar{I}_0 jest nie używane, to musi być przyłączone do masy lub do punktu zdolnego dostarczyć prąd o wartości I_{FS} .



Rys. 5. Przetwornik z wyjściem napięciowym
a — układ, b — tablica opisująca działanie
(dla wybranej kombinacji bitów)



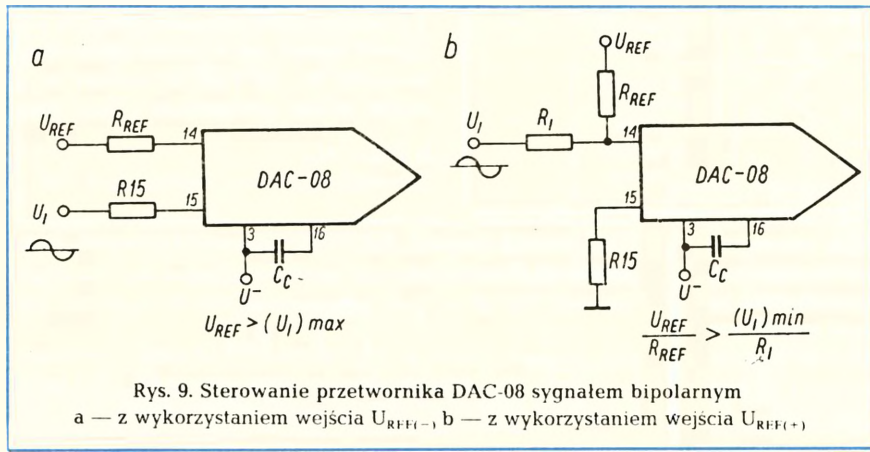
Rys.6. Układ z bipolarnym wyjściem napięciowym
a — układ, b — tablica opisująca działanie
(dla wybranej kombinacji bitów)



Szybkość działania

Zastosowanie konwertera I/U zmniejsza szybkość działania przetwornika. Czas ustalenia prądu wyjściowego przetwornika DAC-08 od wartości 0 do 2 mA z dokładnością odpowiadającą $\frac{1}{2}$ LSB wynosi typowo 85 ns.

Pomiaru dokonuje się w warunkach bardzo małej rezystancji obciążenia. Dołączenie rezystora obciążającego o war-



tości typowej 5 kΩ powoduje wprowadzenie na wyjściu przetwornika stałej czasu

$$\tau = R_n \cdot C_n$$

przy czym:

C_n — pojemność wyjściowa przetwornika.

Dla typowej wartości $C_n = 15$ pF $\tau = 75$ ns. Czas ustalenia napięcia wyjściowego od 0 do -10 V z dokładnością odpowiadającą $\frac{1}{2}$ LSB wynosi 6,2· τ , czyli 500 ns. Czas

ustalenia napięcia wyjściowego można zmniejszyć stosując układ z rys. 7b. Warunkiem koniecznym jest zastosowanie szybkiego wzmacniacza operacyjnego ze starannie dobraną kompensacją częstotliwościową. Można wówczas uzyskać czas ok. 350 ns.

Mnożenie sygnałów

Zastosowanie przetwornika DAC-08 jako układu mnożącego wymaga, aby zgodnie ze zmianami analogowego sygnału wejściowego zmieniał się prąd I_{REF} . W wypadku jeżeli sygnał wejściowy jest unipolarny, można go doprowadzić bezpośrednio w miejsce napięcia odniesienia U_{REF} . Jeżeli sygnał wejściowy jest bipolarny, należy go doprowadzić razem ze źródłem odniesienia U_{REF} , tak aby zapewnić ciągły przepływ prądu I_{REF} . Układy, które można w tym celu zastosować, przedstawiono na rys. 9a, b. Oba układy różnią się rezystancją wejściową oraz sposobem oddziaływania na prąd I_{REF} . W układzie z rys. 8a prąd I_{REF} rośnie, gdy U_i rośnie, natomiast w układzie z rys. 8b przeciwnie: prąd I_{REF} maleje, gdy U_i rośnie.

W wypadku sterowania wejść $U_{REF(+)}$, $U_{REF(-)}$ tylko napięciem stałym wartość pojemności kompensującej C_c wynosi typowo 10 nF. Przy sterowaniu sygnałami zmiennymi, w celu uzyskania szerszego pasma stosuje się mniejsze wartości pojemności C_c . Aby jednak zapewnić stabilność, wartość C_c nie może być mniejsza od:

$$C_{c \min} = 15 \text{ pF dla } R_{14} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$C_{c \min} = 37 \text{ pF dla } R_{14} = 2,5 \text{ k}\Omega$$

$$C_{c \min} = 75 \text{ pF dla } R_{14} = 5 \text{ k}\Omega$$

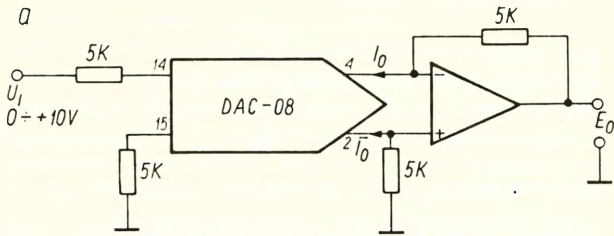
przy czym:

R_{14} — wypadkowa rezystancja widziana z wejścia $U_{REF(+)}$. Dla wartości rezystora R_{14} powyżej 5 kΩ wartość C_c powinna być proporcjonalnie większa.

Na rys. 10 przedstawiono podstawowy układ dwuczwartkowego przetwornika mnożącego. Wejściowy sygnał analogowy jest doprowadzony do wejścia $U_{REF(+)}$ i może się zmieniać w zakresie 0... +10 V.

Wzmacniacz operacyjny, pracujący w układzie przetwornika prąd-napięcie, jest tak dołączony, aby na wyjściu uzyskać napięcia zarówno dodatnie jak i ujemne, w zależności od wartości słowa wejściowego. Uzyskano to wykorzystując do wytworzenia napięcia wyjściowego oba prądy I_n oraz \bar{I}_n .

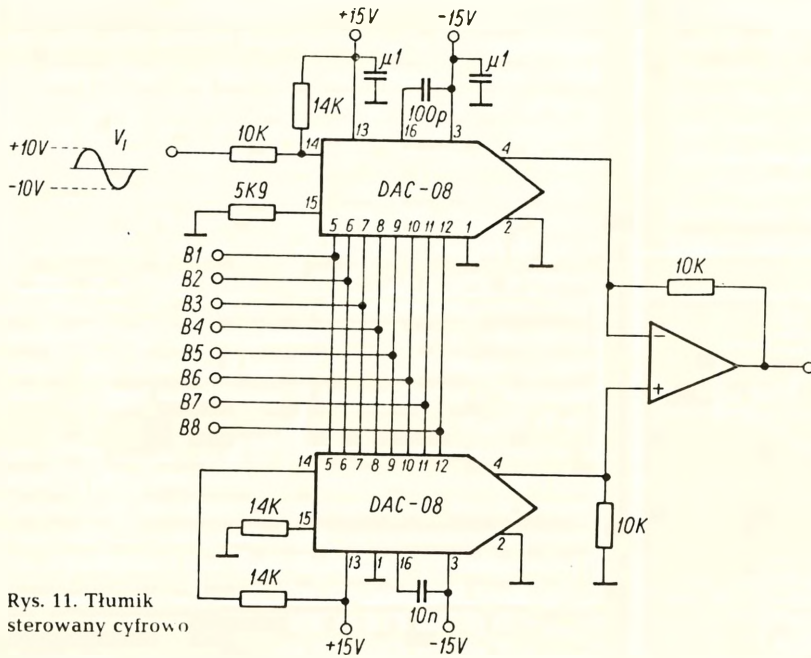
W wypadku gdy $I_n > \bar{I}_n$ napięcie wyjściowe jest dodatnie, natomiast gdy $I_n < \bar{I}_n$ napięcie wyjściowe przyjmuje wartości ujemne. Ilustruje to tablica przedstawiona na rys. 10b. Zastosowanie dwóch przetworników DAC-08 umożliwia zbudowanie układu tłumika sterowanego cyfrowo (rys. 11). Bipolarne napięcie wejściowe jest doprowadzone do wejścia U_{REF} przetwornika górnego i powoduje zmiany prądu odniesienia o ± 1 mA wokół wartości stałej równej 1,1 mA. Dolny przetwornik ma również ustalony prąd odniesienia o wartości 1,1 mA. We wzmacniaczu operacyjnym następuje odejmowanie sygnałów wyjściowych obu przetworników.



Rys. 10. Dwuczwartkowy przetwornik mnożący

B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	I_{01} [mA]	I_{02} [mA]	E_0 [V]
1	1	1	1	1	1	1	1	1,992	0,000	+ 9,96
1	1	1	1	1	1	1	0	1,984	0,008	+ 9,88
1	0	0	0	0	0	0	0	1,000	0,992	+ 0,040
0	1	1	1	1	1	1	1	0,992	1,000	- 0,040
0	0	0	0	0	0	0	1	0,008	1,984	- 9,88
0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	1,992	- 9,96

a — układ, b — tablica opisująca działanie dla $U_i = +10$ V



Rys. 11. Tłumik sterowany cyfrowo

Schemat mnożącego układu czteroczwartkowego jest przedstawiony na rys. 12. Układ ma wejście różnicowe dla sygnału analogowego i pracuje z kodem dwójkowym przesuniętym. Sygnałem wyjściowym, proporcjonalnym do iloczynu sygnałów wejściowych, jest różnica prądów $I_{01}-I_{02}$.

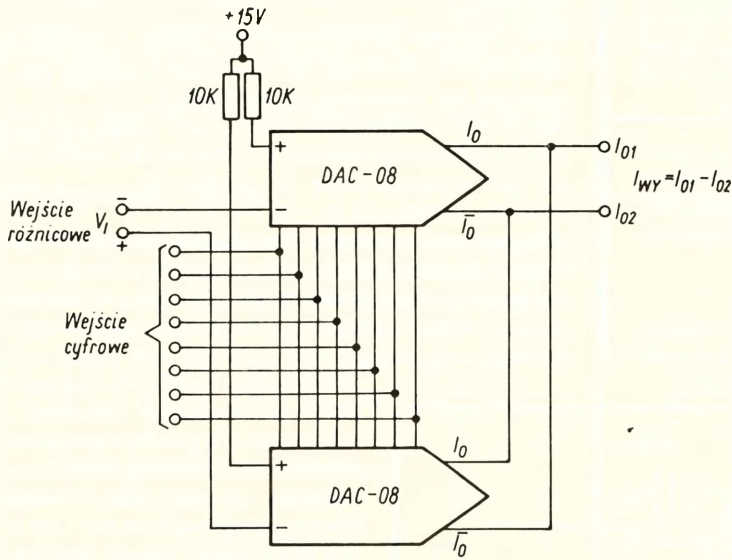
Działanie układu jest stosunkowo proste, lecz dokładny opis zajęłoby zbyt dużo miejsca. Dlatego też analizę układu pozostawiamy Czytelnikom. Warto tylko zaznaczyć, że jeżeli $U_i = 0$, albo kod cyfrowy przyjmuje wartość w połowie zakresu (czyli kodującą zero), wówczas wartość $I_{01}-I_{02}$ jest równa zero niezależnie od stanu drugiego wejścia. Wynika to z faktu, że zero mnożone przez dowolną liczbę daje w wyniku zero.

Przykład zastosowania przetwornika DAC-08

Przetwornik DAC-08 ma wiele zastosowań. Niżej podano dwa wybrane układy, w celu wskazania możliwości różnorodnego wykorzystania przetwornika DAC-08.

Cyfrowe sterowanie timera 555

Na rys. 13 przedstawiono dwa układy ilustrujące sposób cyfrowego sterowania timera 555. W układzie z rys. 13a przerzutnik monostabilny ma czas trwania impulsu wyjściowego programowany w sposób cyfrowy. Przetwornik DAC-08 wraz ze zwierciadłem prądowym wykonanym z tranzystorów T1 i T2 tworzy źródło prądowe, którego wydajność zależy od wartości słowa wejściowego B1...B8. Prąd wyjściowy tego źródła ładuje kondensator C od około 0 V do $\frac{2}{3} U_{cc}$.



Rys. 12. Czteroczwartkowy przetwornik mnożący

W związku z równoległym połączeniem wejść cyfrowych napięcie wyjściowe nie zawiera składowej pochodzącej od stałego prądu 1,1 mA. Napięcie E_0 jest proporcjonalne do iloczynu wartości słowa wejściowego i napięcia wejściowego. Tłumik sterowany cyfrowo jest w istocie dwuczwartkowym układem mnożącym, w którym analogowy sygnał wejściowy jest bipolarny, a kod cyfrowy unipolarny.

Czas trwania impulsu jest równy czasowi ładowania kondensatora C i wynosi:

$$T_w = \frac{2 R_{REF} \cdot C \cdot U_{cc}}{3 \cdot L \cdot U_{REF}}$$

przy czym:

L — liczba zakodowana słowem wejściowym B1...B8. Liczba L może przyjmować wartość całkowitą z zakresu 1 do 255.

$$f = \frac{1}{3} \frac{R_{REF} \cdot U_{CC}}{L \cdot U_{REF}} + 0,695 \frac{R_{REF}}{R_{REF} \cdot C}$$

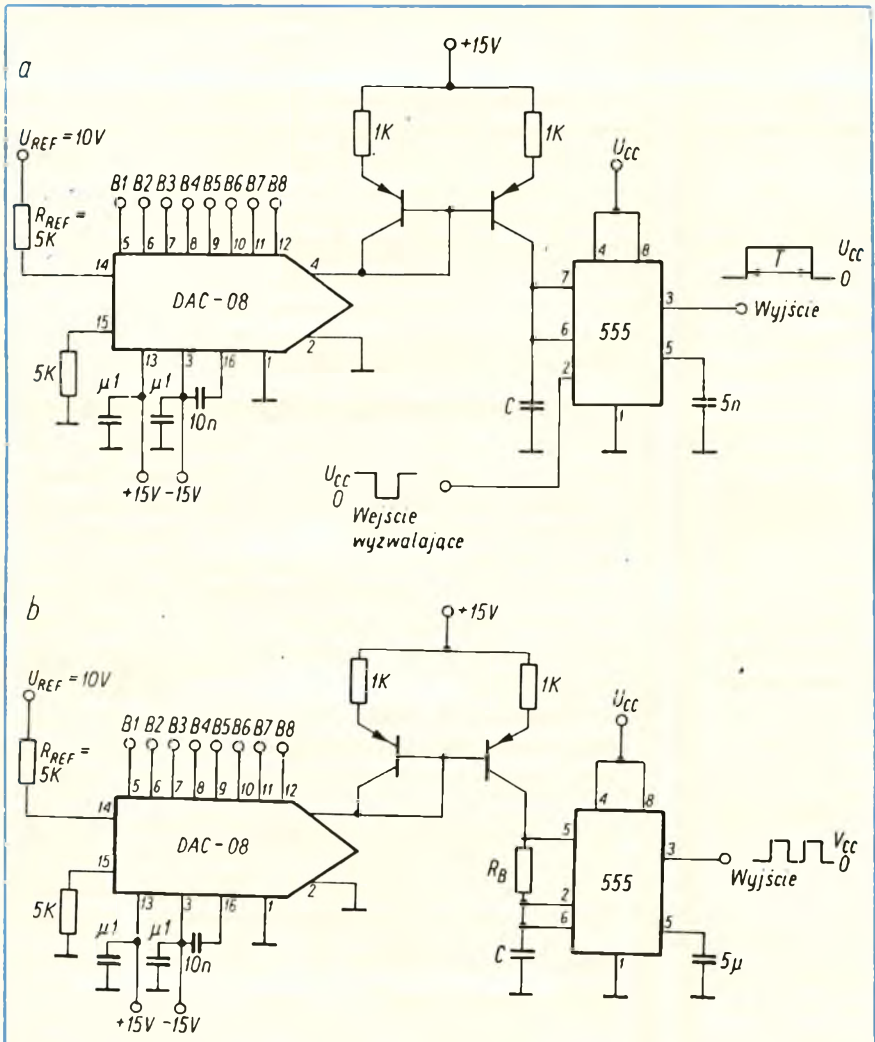
W obu przypadkach nie należy przetwornika c/a sterować słowem 00000000, gdyż wówczas $I_0 = 0$ i nie następuje ładowanie kondensatora C.

Programowany generator. Na rys. 14 przedstawiono schemat generatora, w którym zastosowano przetwornik DAC-08. W zależności od sposobu sterowania licznika układ może generować przebieg trójkątny lub piłokształtny. Pierwsza możliwość polega na takim sterowaniu licznika, aby pracował jako licznik dodający, aż do osiągnięcia maksymalnej liczby zliczeń. W momencie osiągnięcia tego stanu następuje przełączanie licznika, tak aby odejmował impulsy zegarowe. Gdy stan licznika przyjmie wartość zero, ponownie przełącza się go w tryby pracy „dodawanie”. W ten sposób wejścia cyfrowe przetwornika są sterowane sygnałami reprezentującymi kolejne liczby całkowite od 0 do 255 na przemian w porządku rosnącym i malejącym. Na wyjściu uzyska się więc przebieg schodkowy narastający i opadający, który z niewielkim błędem można uważać za przebieg trójkątny. Amplituda tego przebiegu zależy od przyłożonego napięcia U_{REF} .

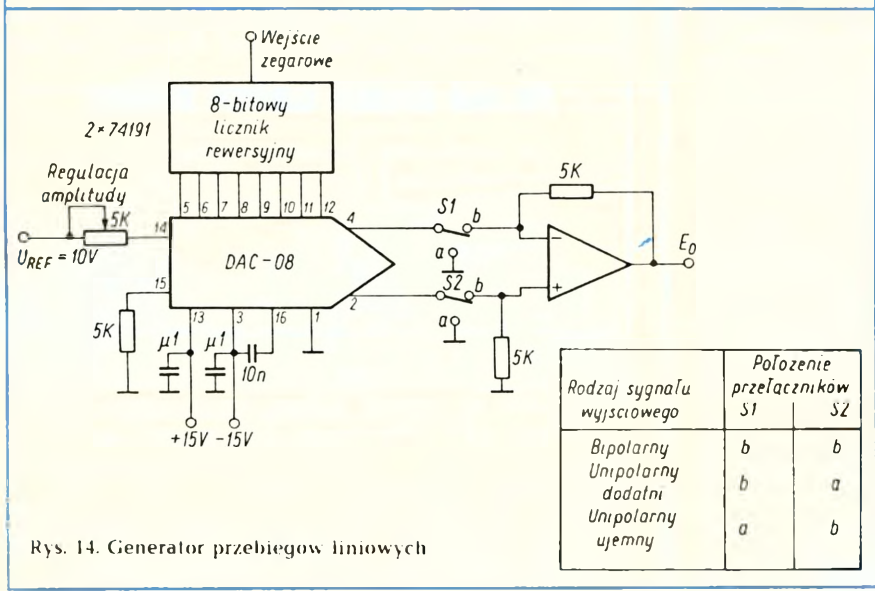
Dруга możliwość polega na pracy licznika wyłącznie jako dodającego. Po osiągnięciu stanu maksymalnego następny impuls zegarowy powoduje wyzerowanie licznika. Na wyjściu pojawia się zatem napięcie piłokształtne liniowo malejące. Trzecia możliwość powstaje, gdy licznik pracuje wyłącznie jako odejmujący i jest podobna do drugiej. Na wyjściu otrzymuje się przebieg piłokształtny liniowo opadający. Tak, jak w pierwszym przypadku, amplitudę napięcia wyjściowego można regulować zmieniając napięcie U_{REF} .

Możliwości podanego układu można znacznie rozszerzyć przez włączenie między wyjście licznika a wejście przetwornika DAC-08 pamięci typu ROM o długości słowa 8. bitów. Pamięć tę można zaprogramować tak, aby uzyskać żądany kształt przebiegu wyjściowego (np. sinusoidę).

Cechą charakterystyczną układu jest fakt, że kształt przebiegu wyjściowego nie zależy od jego częstotliwości. Częstotliwość można łatwo regulować zmieniając częstotliwość przebiegu zegarowego. Maksymalna, możliwa do uzyskania częstotliwość przebiegu wyjściowego wynosi kilkadziesiąt kHz.



Rys. 13. Cyfrowe sterowanie timera 555 a — układ monostabilny, b — układ astabilny



Rodzaj sygnału wyjściowego	Położenie przełączników	
	S1	S2
Bipolarny	b	b
Unipolarny dodatni	b	a
Unipolarny ujemny	a	b

Rys. 14. Generator przebiegów liniowych

Podobnie jest wykonany układ astabilny przedstawiony na rys. 13b. Dodatkowo zastosowano rezystor R_B , aby rozładowanie rezystora C do wartości początkowej ok. $\frac{1}{3} U_{CC}$ nie nastąpiło natychmiast, lecz odbywało się ze stałą czasu $R_B C$. Częstotliwość wyjściowa jest tym samym równa:

LITERATURA

[1] Nadachowski M., Kulka Z.: Analogowe układy scalone. WKŁ 1985
 [2] Seitzer D. I in: Electronics Analog-to-Digital Converters. Wiley 1984
 [3] Prevodnik D/A 8 bitu MDAC-08. TESLA 1982
 [4] PMI Full Line Catalogue 1979